

Elementarteilchen:

(wichtige Eigenschaften:

- elektr. Ladung
- (Ruhe-) Masse
- magnet. Moment
- Eigen Drehimpuls)

Leptonen:

(Spin =  $\frac{1}{2} \hbar$ )

(schwache Wkr)

• Elektron, Positron ( $e^-, e^+$ )

• neg./posit. Myon ( $\mu^-, \mu^+$ )

• Neutrinos, Antineutrinos ( $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ )

Hadronen:

Mesonen:

(ganzzahliger Spin)

• geringe Lebensdauer

• Bestandteil d. Höhenstrahlung

Baryonen:

(halbzahliger Spin)

• Nukleonen (Proton, Neutron + Antiteilchen)

• Hyperonen

aus Quarks zusammengesetzt

U-Quark:  $+\frac{2}{3}e$

d-Quark:  $-\frac{1}{3}e$

z.B.  $p \hat{=} 2u + 1d$

$n \hat{=} 1u + 2d$

$\pi$ -Meson  $\hat{=} \text{Quark} + \text{Anti-Quark}$

(Quarks können experimentell nicht nachgewiesen werden, da die zu ihrer Trennung erforderliche E größer ist als den E-Äquivalent d. Teilchennamen)

Elementarladung:

Nachweis: Millikan-Versuch:

geladene Öl-Tröpfchen im E-Feld haben alle eine Vielfache Ladung d. Elementarladung

$$e = \frac{F}{N_A} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

Magnet. Moment:

Nachweis: Stern-Gerlach-Versuch:  $F = \pm \mu \cdot \frac{dB}{dz}$

• wird in Einheit d. Bohrschen Magnetons angegeben ( $\mu_B = \frac{e}{m_e} \cdot \frac{h}{4\pi} = 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$ )  
(bei Baryon in Einheit d. Kernmagnetons)

Röntgenstrahlung:

• entsteht, wenn hochenerget. Elektronen ( $10 \text{ keV} < W_e < 100 \text{ keV}$ ) auf ein Metall treffen

(i) Bremsstrahlung:  $e^-$  werden im Kernfeld abgebremst, d.h. verlieren  $W_{kin}$   
• Röntgenstrahlung mit kontinuierl. Wellenlängenverteilung



(ii) charakt. Strahlung: • wird kritische, materialabh.  $e^-$ -Energie überlitten  
•  $\lambda$  abhängig vom Metall, nicht von  $e^-$ -Energie

• hochenerget.  $e^-$  schlägt  $e^-$  aus d. untersten Schale heraus  $\rightarrow$  freie Platz wird aufgefüllt  
 $\rightarrow$  Emission von Röntgenstrahlung

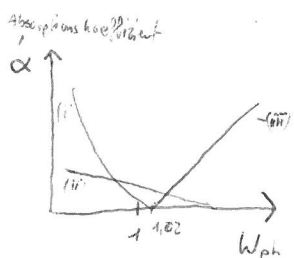
Bragg-Reflexion:



$$2d \sin \theta = n \cdot \lambda$$

$\Rightarrow$  Davisson-Germer-Versuch

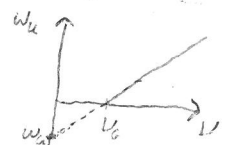
Teilcheneigenschaften von Photonen:



(i) Äußere lichtelektr. Effekt: • Photonen lösen  $e^-$  aus Metall ( $W_{kin} \sim U$ )  
(Photo-Effekt)

(ii) Compton-Effekt: Photonen übertragen  $W$  und  $p$  auf  $e^-$

(iii) Paarbildung: Photon erzeugt  $e^-/h^-$ -Paar (Mindestenergie:  $1,022 \text{ MeV}$ )



Zerstrahlung: Teilchen + Antiteilchen  $\rightarrow$  Positronium  $\rightarrow$  2 Photonen  
(Annihilation) (unbrems. gemeins. Schwerpunkt)

De-Broglie-Wellen:

• Welleneigenschaften von Materie:  
• Nachweis: Davisson-Germer-Versuch

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

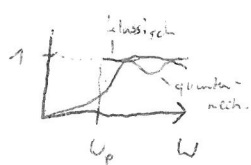
Schrödinger-Gleichung: 1.) Stationärer Fall:  $\Delta \Psi + \frac{2m_e}{\hbar^2} (W - W_p) \Psi = 0$   $|\Psi|^2 \hat{=} \text{Aufenthaltswahrsch.}$

$$\int_V |\Psi|^2 dV = 1 \quad (*)$$

ist bestimmtes, zeitunabhängiges Problem vorgegeben, so erhält man die Lösung d. Schrödinger-Gleichung unter Berücksichtigung d. Randbedingungen und mit (\*)

- besonders einfache Lsg.: im „Potentialtopf“  
( $E$  stückweise konstant)

Tunneleffekt: Teilchen überwindet (durchtunnelt) Potentialbarriere (klassisch unmöglich)



$$T = e^{-2 \sqrt{2m \Delta W} \cdot \frac{d}{\hbar}} \quad (\text{für } W_p(x) = \text{const.}) \quad [\text{allg.: } T = \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_a^d \sqrt{2m \Delta W(x)} dx\right)]$$

Heisenbergsche Unschärferelation: verschiedene physikal. Menggrößen können nicht gleichzeitig beliebig genau gemessen werden  $\rightarrow$  Messgenauigkeit wird prinzipiell eingeengt

$$\Delta W \cdot \Delta t \geq \hbar \quad \text{oder} \quad \Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar$$

Bohrsches Atommodell:

Hauptquantenzahl  $n$

Beim H-Atom:  $W_n = - \frac{m_e \cdot e^4}{8 \epsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -W_I \cdot \frac{1}{n^2}$

Rydberg-Energie = Ionisierungsenergie d. H-Atoms

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2 \epsilon_0}{\pi m_e e^2} \quad (\text{Bohrscher Atomradius})$$

Atomkern wird als ruhend angenommen  $\rightarrow$  bei Berücksichtigung  $m_e' = \frac{m_e \cdot m_p}{m_e + m_p}$  (reduzierte e-Masse)

Spektral-Linien:  $h \cdot \nu = W_I \cdot \left( \frac{1}{n_k^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$

bei Emission:  $n_k = 1$  Lyman-Serie  
 $n_k = 2$  Balmer-Serie  
 $n_k = 3$  Paschen-Serie  
 $n_k = 4$  Brackett-Serie  
 $n_k = 5$  Pfund-Serie

bei Absorption: nur Anregung aus Grundzustand ( $n=1$ )

Separationskonstanten:

$l$  = Nebenquantenzahl (Drehimpuls-QZ)

$m_l$  = Orientierung-QZ (magnet. QZ)

$m_s$  = Spin-QZ

Gesamt: Schwerpunkte d. räuml. Dichtefkt. bei vorgegebener Haupt-QZ rücken mit zunehmender Neben-QZ näher an Kern heran

Auswahlregel: nur Übergänge mit  $\Delta l = \pm 1$  möglich (da Photon Drehimpuls 1 hat)

im Magnetfeld wird die Entartung bgl.  $m_l$  aufgehoben  $\rightarrow$  Auswahlregel (Zeeman-Effekt):

$$\Delta m_l = 0 \quad \text{oder} \quad \Delta m_l = \pm 1$$

$\Rightarrow$  3 Spektrallinien

$n$  &  $l$  bestimmen energet. Lage  $\hookrightarrow n^2$ -fache Entartung hinsichtlich der QZ  $l$  und  $m_l$

Entartung insgesamt:  $2n^2$ -fach

Pauli-Prinzip: Ein Energielevel kann nur mit einem  $e^-$  besetzt sein (bzw. mit  $n$  Elektronen, wenn  $n$  der Entartungsgrad ist)

Mehrelektronenatome: - Aufhebung d. Entartung vom Neben- $l$  (→ %l.: bei H-Atom energet. Lage nur abhängig von  $n$ )

↳ 2s-Konf. weist ein kleines Nebenmaximum auf und wird somit stärker von posit. Kernladung beeinflusst als 2p-Konfig. (m.a.W.: die partielle Abschirmung d. Kernladung durch 1s-Elektronen hat hinsichtlich d. 2s-Konfig. eine geringere Wirkung als bzgl. d. 2p-Konfig.)

• bei Schalen mit höheren Haupt- $l$  resultiert eine Überlappung von Energie-Niveaus mit untersch. Drehimpuls- $l$  → Bsp.: 4s liegt energet. niedriger als 3d → 3d-Übergangsmetalle

• Nebengruppenelemente: 3d, 4d, 5d

• Seltene Erden: 4f

• Hund'sche Regel: größtmögl. Wert d. resultierenden Gesamtspins

(da sich Zustände untersch. Spinorientierung energet. nur wenig voneinander unterscheiden, ist die Wechselwirkung d. Atome in einem Festkörper ggf. ausreichend, um eine Veränderung d. Spinorientierung in d. äußersten Schale zu bewirken → Hund'sche Regel gilt dann nur für innere Schalen)

• Parallelstellung d. Spins und damit magnet. Momente in nicht-abgeschl. Schalen kann zu ferromagnet. Verhalten führen.

### Laser/Maser

Prinzip: • durch Pumpen wird eine Besetzungsinversion erreicht ( $N_2 > N_1$ )

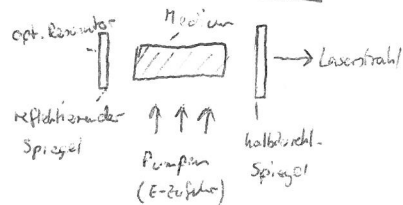
• im invertierten Zustand überwiegt die stimulierte Emission

↳ Kohärente Strahlung (gleiche Phase, Wellenlänge, Richtung)

• im Laser: Kohärente Strahlung wird begünstigt, Spontane Emission reduziert

$N_1$ : Atome in Grundzustand

$N_2$ : A. in angeregten Zustand



### Bändermodell

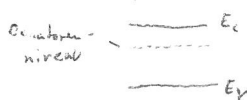
• mit ~ können die meisten elektr., opt. und therm. Eigenschaften eines Festkörpers erklärt werden

• Leitungsband: äußerste, nicht-volle Band: beim Anlegen von Spannung können  $e^-$  Energie aufnehmen → Leitungsprozess  
• es können  $e^-$  eingebracht werden

• Valenzband: äußerste, vollbesetzte Band: liefern keinen Beitrag zur Leitfähigkeit

• Bandlücke: entscheidend für Leitfähigkeit (→ Leiter, HL, Isolator)  
~0      0-2eV      >3eV

• Halbleiter: Eigen-HL: auf Grund d. therm. Energie gelangen ein paar  $e^-$  vom VB ins LB



n-Typ-HL: Einbringen von 5-wertigen Donatoren schafft zusätzliche höhere E-Niveaus, von denen  $e^-$  leichter ins CB gebracht werden können



p-Typ-HL: Einbringen von 3-wertigen Akzeptoren schafft zusätzliche E-Niveaus, die  $e^-$  aus dem Valenzband aufnehmen können.

### Atomkern

• Masse eines zusammengesetzten Teilchens: Masse d. einzelnen Teilchen - Masseäquivalent zur Wein.

• Isotope: gleiche Protonenzahl, untersch. Neutronenzahl

Isobare: gleiche Massenzahl

Isotone: gleiche Neutronenzahl

• gg-Kern: gerade p, gerade n → besonders stabil;  $8 \leq Z \leq 15$ : Z gerade: 3 Isotope (2 gg, 1 gu)

gu-Kern: gerade p, ungerade n

Z ungerade: 1 Isotop

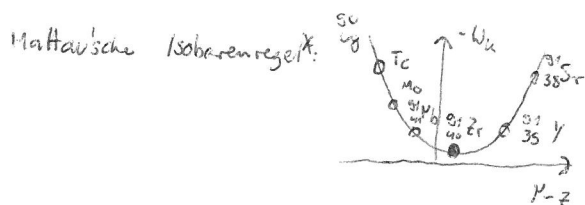
ug-Kern: ungerade p, gerade n

uu-Kern: ungerade p & n

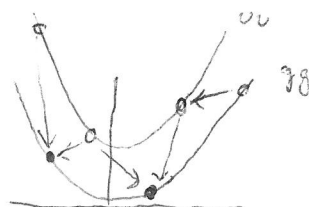
→ besonders instabil

bis  $Z \approx 16$  :  $\frac{p}{n} \approx 1$  ;  $Z > 16$  : Neutronenüberschuss (Coulomb-Kräfte besitzen ein - im Vgl zu den Kernkräften - große Reichweite)

Kernradius:  $r_k = A^{\frac{1}{3}} r_p$  ( $r_p = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ )



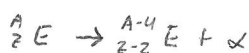
→ es kann bei ungerader Massenzahl nur 1 stabiles Kern existieren



bei geringer Massenzahl verlaufen Parabeläste steiler  
→ es kann kein höherer Bindungsenergie haben

→ bei gerader Massenzahl können 2 (oder mehr) stabile Isobare existieren; die Ordnungszahl dieser muss sich um 2 Einheiten unterscheiden

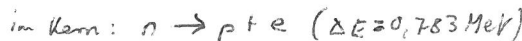
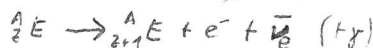
Kernzerfall: (i)  $\alpha$ -Strahlung: bei Nukliden mit sehr hoher Massenzahl / Protonenüberschuss ( $A \geq 210$ )



• diskrete E-Werte  
• müssen Potential-Wall (Coulomb-Wall) durchtunneln  
• Zusammenhang zw. Teilchen-E und  $T_H$   
(Geiger-Nuttall-Beziehung)  $\log \lambda \uparrow$

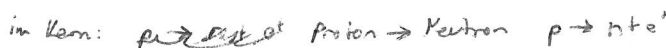
(ii)  $\beta$ -Strahlung:  $\frac{n}{p} > \text{opt. Verhältnis}$

— kontinuierl. E-Spektrum



→ Hinzurechnen ist Differenz d. Bindungsenergien

(iii) Positron /  $\beta^+$ -Strahlung:  $\frac{n}{p} < \text{opt. Verhältnis}$



Kernumwandlung: • Beschuss durch  $n, p, f, d, \alpha, \gamma$ -Strahlung (Kernphotoeffekt)

Kernzertrümmerung (Spallation): • Beschuss durch energiereiche Teilchen  
• Neutronen-Emission (→ Neutronenquelle)

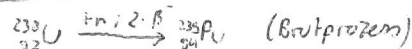
Kettenreaktion: • Moderator bremst schnelle  $n$  ab  
• Absorber absorbiert  $n$  (→ kontroll. Rk.)  
• Reflektor reflektiert  $n$

Reaktoren: LWR: •  $\text{H}_2\text{O}$  als Kühlmittel & Moderator

→ große Absorptionsquerschnitt f. therm. Neutronen → Anreicherung von 3-4% notwendig

SWR: •  $\text{D}_2\text{O}$  ... → Deuterium hat geringeren Absorptionsquerschnitt → mit Natururan

HTR: Graphit als Moderator; Wärmeabfuhr über Gas ( $\text{He}, \text{CO}_2$ ); als Brutstoff kann Plutonium dienen (PL:  ${}^{239}\text{Pu}$  -  $\text{U} + \text{e}$ )



nicht spaltbar spaltbar  
wird gespalten  
↳ E

das verbleibende Pu kann nach Wiederaufarbeitung mit angereicherterem Uran als Spaltstoff im sogenannten MOX-Brennelementen eingesetzt werden. Mischoxid aus  $\text{PuO}_2$  und  $\text{UO}_2$

- SVR (schneller Vakuum-Reaktor) :
- Bruttoreate wird durch schnelle Neutronen erhöht
  - Flüssiges Na als Moderator & Wärmeabführendes Mittel
  - auch Einsatz von MOX möglich
  - Energieausbeute von Reaktoren von 1% auf 60%

Kernfusion : in der Sonne : Bethe-Weizsäcker-Zyklus :

- Anlagerung von  $p^+$  an  $^{12}_6C$ -Kern
- weitere Anlagerungs-/Emissionsprozesse
- ↳ hochangeregter  $^{16}_8O$ -Kern, der  $\alpha$  emittiert